干旱区季节性湖泊面积动态变化及蒸发量
——以艾丁湖为例

曹国亮， 李天辰， 陆垂裕， 徐志侠
（中国水利水电科学研究院，北京 100038）

摘 要：干旱区湖泊对气候变化和人类活动的影响极为敏感，湖泊面积变化是区域水循环和水平衡改变的结果。以新疆吐鲁番艾丁湖为例，利用陆地卫星遥感影像采用水体指数法解译了艾丁湖1986—2018年的湖泊面积变化，分析了湖泊面积变化与区域气候变化、河流径流量变化的相关关系，并分析了艾丁湖历年最大湖水容积和湖面蒸发量变化。结果表明：艾丁湖最大湖面面积一般在3月，湖泊最大面积的年际变化规律与入湖河流径流变化基本一致，自1980年代中期以来，东天山冰川萎缩造成河流径流增加，艾丁湖总体呈增大趋势；1996—2006年计算的最大湖水容积要明显大于湖水蒸发量。2006年以后随径流增加趋势减弱，湖面面积缩小。干旱区气温变化导致冰川萎缩影响的河流径流量是影响干旱区河流尾闾湖泊面积变化的决定性因素。

关键词：干旱区；季节性湖泊；湖泊面积；艾丁湖

湖泊是陆地水圈和水循环的重要组成部分，特别是干旱区内陆湖泊具有独特的水文、水化学和水生态性质[1]。干旱区水循环以内陆河流域为纽带，高山冰雪融水汇集于内陆盆地形成河流尾闾湖泊，同时也是盆地地下水的排泄基准点，生态系统以水为纽带联结相互依存并相互作用，干旱区湖泊对于维持当地生态系统起着重要作用。干旱区湖泊对气候变化和人类活动的影响极为敏感，不仅是干旱区气候变化的指示计，其变化也是区域水循环和水平衡改变的结果，干旱区湖泊变化规律的研究不仅对干旱区水循环机理有重要科学意义，也是保护干旱区脆弱生态环境，实现人与湖泊和谐共处的基础[2-3]。

我国干旱区湖泊主要分布在新疆境内，干旱区湖泊不仅对于维持干旱区的水生态环境具有重要意义，同时也是重要的人文景观，对干旱区旅游业的发展有一定影响。然而调查显示近50 a来，我国很多湖泊面积萎缩甚至消失，集中在北方地区，其中新疆消失湖泊的数量最多[4]。干旱区湖泊面积的变化是气候变化和人类活动对脆弱生态环境影响的指示器，湖泊萎缩甚至消失对干旱区所存在的生态环境已经造成了严重危机[5]。已有研究利用遥感数据分析了区域性和典型湖泊面积的变化，新疆干旱区湖泊面积总体上从20世纪80年代中后期至2000年左右呈增大趋势，2000年以后受人类活动影响增强，总体上呈减小趋势[6]。艾丁湖为典型干旱区湖泊，地形测量、航片和遥感监测等研究表明：在80年代以前，艾丁湖面积总体上呈不断萎缩趋势，湖泊来水量和湖面蒸发量是控制湖泊面积的主要因素，50年代以来水资源开发，特别是农业引水量的大幅增加是造成艾丁湖萎缩的一个重要原因[7-8]。祁晨[9]利用遥感水体指数方法，解译了艾丁湖1972—2004年11个不同日期的艾丁湖湖面面积，并与气温和降水量进行了相关分析。阿依姑丽·托合提[10]采用灰色关联度方法，将艾丁湖面积变化与人口和经济结构、降雨量和总径流量等驱动因子变化关系进行了分析。王冰[11]基于典型年份艾丁湖面积的目视解译，计算了艾丁湖的生态需水量。艾丁湖成为季节性湖泊以来，由于湖水较浅但蒸发量较大，经历过多次干涸和恢复，而以往区域性湖泊面积变化研究多针对的是常年性湖泊的年际变化研究，对季节性湖泊研究较少，对艾丁湖面积变化的研究中均采取选择典型日期进行湖水面积解译的

收稿日期：2019-12-20； **修订日期：**2020-05-12
基金项目：国家重点研发计划课题（2017YFC0406102）资助
作者简介：曹国亮（1981-），男，博士，高级工程师，从事水文地质研究. E-mail: caogl@cugb.edu.cn

方法，很难同时反映湖泊面积的年际和季节变化，也难以用于计算湖面的年蒸发量。本文以新疆吐鲁番盆地的艾丁湖为研究对象，在分析湖泊面积年际和季节性变化及驱动因素的基础上，计算了湖面蒸发量，并与干旱区典型盐湖的蒸发量进行了对比。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

位于新疆吐鲁番盆地的艾丁湖典型的干旱区内陆湖泊，目前湖盆底海拔-154.4 m，是我国最低洼地，也是世界第二低地，是吐鲁番水系的尾闾湖泊以及地下水的基准排泄点。湖泊沉积物分析显示，艾丁湖在上新世末为淡水湖[8]。中更新世以来渐变成盐水湖，全新世以来湖泊面积进一步缩小。艾丁湖所处的吐鲁番盆地深处内陆，蒸发量极大，加之上游引水灌溉截取了入湖河流径流，艾丁湖水面不断缩小，已经演变成季节性湖泊[8]。随湖泊面积萎缩，流域土地沙化面积增加，沙尘中含有的大量盐分（盐尘）将加速天山博格达峰及东天山冰川退缩，对吐鲁番盆地生态环境产生巨大影响。

目前，有来水注入艾丁湖的河流主要有阿拉沟和白杨河。除地表水补给外也可能存在地下水补给，地下水补给盐湖主要为两种形式：一种是地下水在湖边溢出成泉，泉水随即流入湖中；另一种是承压自流水，分布在湖周围甚至湖中心。盐湖中心承压水头往往最高，是大多数盐湖的重要补给水源[12]。艾丁湖周围目前没有地下水井观测地下水，但艾丁湖以西存在泉水溢出和承压自流水分布区，托克逊县城内有深层承压自流水，吐鲁番县南红星长绒棉场存在承压自流水，据此推断艾丁湖中心应存在承压自流水[12]。

1.2 遥感数据与处理

采用陆地卫星（LandSat）1986年11月至2019年6月的影像数据。覆盖研究区的陆地卫星影像数据包括共有LandSat-5卫星影像数据409幅、LandSat-7卫星影像数据313幅、LandSat-8卫星影像数据134幅。其中1986—2010年的湖泊面积分析采用LandSat-5数据，2011—2013年采用LandSat-7数据，2014—2019年采用LandSat-8数据，遥感图像处理依托Google Earth Engine（简称GEE）[13]平台进行，GEE依托谷歌云平台通过在线或离线编程的方式获取和处理共享数据，避免了数据下载、预处理影像等过程，能较大程度提高数据处理效率。

在GEE平台中将遥感数据载入后，首先利用影像中的质量评价（QA）波段对云及云影进行掩膜计算。QA波段由CFmask（C Language Function of Mask）检测方法得到，对于云识别效果良好[14]。进行水面像元数目统计时，利用GEE的Geometry属性将研究范围限制在包含湖区的多边形范围内，因此，湖区以外的影像质量对水面提取不会造成影响。水面提取利用水体指数进行计算，通过测试不同的水体指数阈值发现，水体指数阈值取0.1能较好的提取湖面水体范围，水体指数太小时提取水体面积过大。对常见的几种水体指数进行对比发现，改进的归一化水体指数（mNDWI）和增强型水体指数（EWI）划分水体面积较大，将湿润的湖岸土壤也划为了水体，归一化水体指数（NDWI）能更好的抑制干涸湖底的影响[15]，最终采用NDWI水体指数计算湖泊面积。

1.3 气象及水文数据

气象数据采用吐鲁番气象站的气温和蒸发皿数据，数据序列均为1960—2017年。吐鲁番气象站自1986年在非冰期的4—10月采用E_{601}型蒸发皿进行蒸发观测，冰期的11月至次年3月采用20 cm口径蒸发皿进行观测，新疆北部地区冰期20 cm蒸发皿和E_{601}型蒸发皿观测值间的折算系数为0.55[16]，将冰期蒸发量观测折算后，得到吐鲁番气象站1986—2017年E_{601}型蒸发皿观测蒸发量。

阿拉沟下游河道中的水并没有直接流入艾丁湖，而是在白杨河上的托台渠首之前汇入白杨河。河流径流量由于沿程引水，径流量可能沿程发生显著变化，白杨河从托台渠首向下游开始基本上不再存在沿程引水，但和地下水可能发生相互转换，最终流入艾丁湖[17]。河流径流数据采取的为阿拉沟和煤窑沟1960—2017年的年径流量。

2 艾丁湖面积变化及驱动因素

2.1 湖泊面积变化

1986年以来，艾丁湖湖面积年内最大面积≤2 km²，基本上常年处于干涸状态的时段主要为2009年。其他年份冬季湖泊能维持5 km²以上的湖面积，但在夏季湖泊完全干涸（图1）。湖面积在1986—

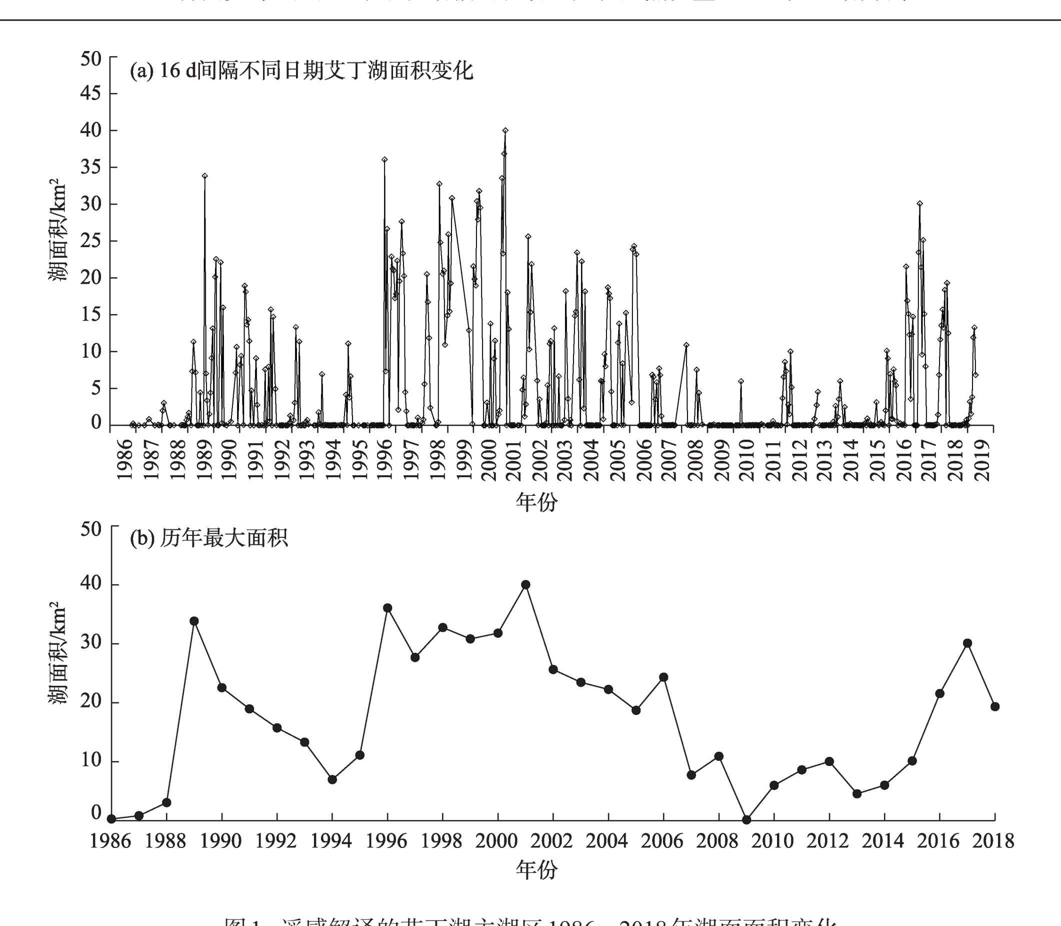


图1　遥感解译的艾丁湖主湖区1986—2018年湖面面积变化

Fig. 1　Variation of area of the Aiding Lake during 1986-2018

2000年整体呈增大趋势，2000—2009年呈减小趋势，2010—2018年呈增大趋势。干旱区湖泊的主要补给来源是源头山区的冰雪融水，径流出山后多受人类活动干预和蒸发影响，能够汇入湖泊的只是径流的一小部分。因此，湖泊源区的气候变化决定了湖泊的径流补给量，而湖泊上游绿洲的农业需水量和湖泊的蒸发量决定了入湖水量和水面消耗，对湖泊面积和这些因素的相关性分析是研究干旱区湖泊变化的主要内容。

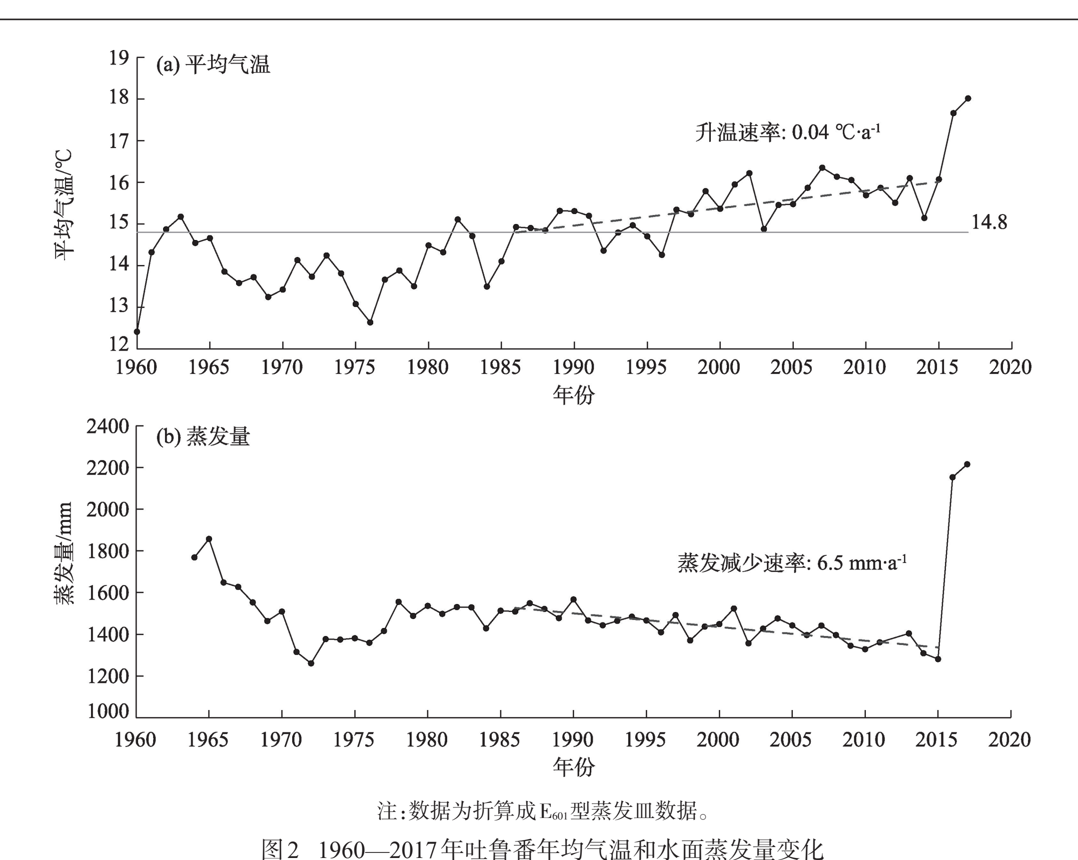
2.2　区域气候变化影响

自1986年以来，吐鲁番气温高于多年平均气温且呈显著增加趋势，1986—2015年平均气温升高速率约为0.04 ℃·a^{-1}（图2）。2016年和2017年受厄尔尼诺影响[18]，平均气温显著偏高，分别高出多年平均的2.9 ℃和3.3 ℃，为1960年以来最高值。吐鲁番气候大致以20世纪80年代中期为转折点，1986年以后明显变暖[19]。1986—2015年吐鲁番水面蒸发量呈明显的下降趋势，年均减少速率为6.5 mm·a^{-1}（图2）。水面蒸发量的减小主要与风速减小有关[20]。2016年和2017年蒸发量增大与气温显著偏高有关。

2.3　河流径流量对湖泊变化的影响

对于发源于天山的阿拉沟、白杨河等河流，出山径流对气候变化的敏感程度取决于冰雪融水所占的份额，对于地下水补给为主的河流，出山径流的变化还要考虑降雨量的影响[21]。阿拉沟流域冰川覆盖率为1.56%，阿拉沟典型年径流分割表明阿拉沟径流中冰雪融水占31.1%，降水占35.6%，地下水占33.3%[17]。阿拉沟径流和气温呈正相关性，但径流变化滞后温度3个月左右[22]。1956以来，阿拉沟径流变化在1988年存在一个突变点，1988年以前径流变化趋势不明显，1988年以后随气温突变升高，总体呈增加趋势，在2002年左右径流量达到峰值（图3）。

艾丁湖成为季节性湖泊以后，历年湖泊最大面积的年际变化规律与阿拉沟径流变化基本一致，1986—2001年总体呈增大趋势，2001—2012年呈减小趋势，2014年以后又开始增大，最大湖面积与阿拉沟径流量呈正相关关系（图4）。艾丁湖作为冰雪融水为主要补给河流的尾闾，气候变化控制的河流径流量大小仍是决定湖面积变化的决定性因素。



注：数据为折算成E_{601}型蒸发皿数据。

图2 1960—2017年吐鲁番年均气温和水面蒸发量变化

Fig. 2 Variations ofair temperature and E_{601} pan evaporation in Turpan during 1960–2017

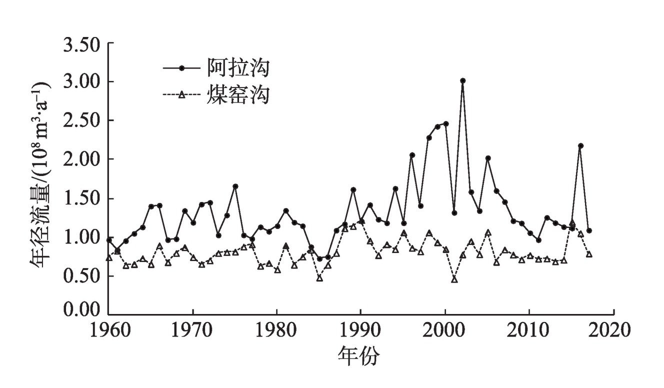


图3 1960—2017年吐鲁番阿拉沟、煤窑沟径流量

Fig. 3 Runoff of Alagou and Meiyaogou rivers in Turpan during 1960–2017

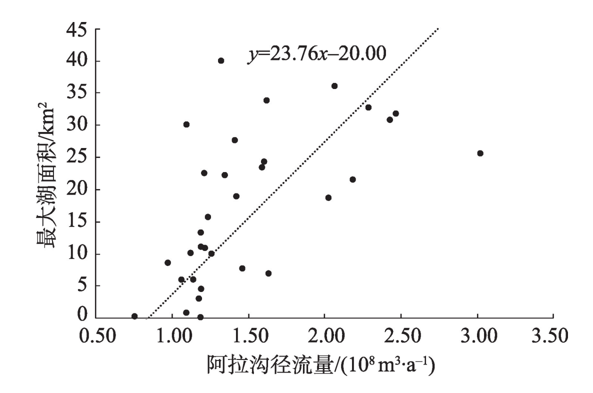


图4 艾丁湖湖面积与阿拉沟径流量（1986—2017年）相关关系

Fig. 4 Relationship between annual maximum area of the Aiding Lake and runoff of Alagou River (1986–2017)

但湖泊面积扩大的代价是天山冰川面积的萎缩。博格达山脉遥感监测分析表明，东天山地区近40 a来冰川退缩明显，其南坡冰川退缩最为显著[23]。随冰川面积萎缩，冰川对河流的补给调节作用减弱，冰川融水对径流贡献量逐渐减少[24]，2001—2015年阿拉沟径流增加趋势已明显减弱，说明径流已经开始受冰川萎缩影响。洪水径流也是引起个别年份湖面面积显著扩大的重要因素。吐鲁番盆地1996年发生特大洪水，大量洪水径流泄入艾丁湖区，造成艾丁湖1996年湖面面积显著扩大，1997—2000年又连续丰水，艾丁湖在1996—2001年一直维持较大的湖面面积，与1996年洪水和之后的丰水期有较大关系。

艾丁湖位于吐鲁番盆地地势最低点，也是地下水的最终排泄通道，但20世纪80年代以来，艾丁湖在夏季基本都处于干涸状态，说明区内地下水对艾丁湖水的直接贡献较蒸发影响是非常有限的，但山区地下水通过影响径流间接对艾丁湖造成影响。

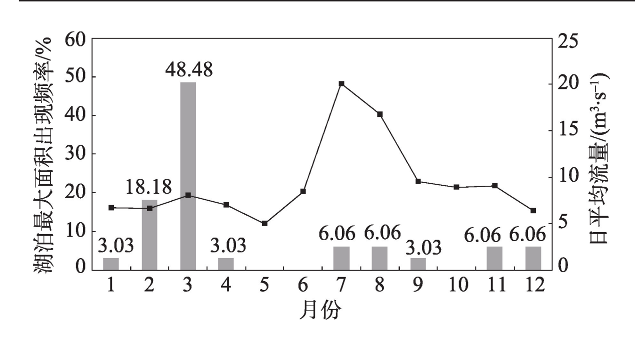


图5 艾丁湖湖泊最大面积各月出现频率与阿拉沟和白杨河总流量季节变化

Fig. 5 Frequency of occurrence of maximum lake area in each month of the Aiding Lake and the monthly variation of the runoff of the Alagou River plus Baiyang River

艾丁湖最大湖面积主要出现在11月至次年3月，出现在3月的频率约为48%(图5)。阿拉沟多年平均冬季(12月至次年2月)径流量占年径流量的14%[22]，阿拉沟约1/3的径流由地下水贡献，说明阿拉沟冬季径流的主要来源是地下水。随气温升高，高山冻土不断退化，下渗水及地下水增加，造成阿拉沟冬季径流不断增加[22]。山区地下水以基流形式排泄入河，最终汇入艾丁湖后在夏季被蒸发消耗殆尽。天山山区水储量变化的季节与山区降雨变换规律一致，从8月到次年2月，天山山区水储量变化为亏损状态[25]，减少的冰雪和地下水储量成为该段时期河流径流和艾丁湖水量的主要来源。对于类似艾丁湖的干旱区季节性湖泊，山区水储量，包括冰雪、冻土和地下水储量的长期变化趋势和季节变化也是影响干旱区季节性湖泊面积变化的主要因素。

2.4 人类活动对湖泊变化的影响

吐鲁番地区全地区水资源总量为12.6×10⁸ m³，长期以来在水资源开发利用上形成了以农业经济为主的用水结构。农业用水量占全地区总用水量的90%，但总引用水量为13.8×10⁸ m³。农业引水造成白杨河、阿拉沟等河流入湖流量明显减少外，地下水超采造成了湖区原有承压自流水水位下降，导致地下水对湖泊补给量减小。吐鲁番地区水资源开发利用程度过高也是影响艾丁湖面积变化的重要原因。

3 艾丁湖湖水容积与蒸发量

3.1 艾丁湖湖水容积变化

干旱区湖泊湖面蒸发量和入湖水量是分析湖泊水量平衡的主要因素[26]。艾丁湖入湖水量没有监测资料，湖水容积变化可作为艾丁湖水量平衡分析的重要参考。艾丁湖平均湖水深度不足1 m，湖盆为典型的浅碟形。采用湖盆高程栅格数据，利用ArcGIS的SurfaceVolume栅格空间分析功能计算不同湖水位高程下的湖泊面积和湖水容积，得到艾丁湖主湖区对应湖水位的湖水容积曲线(图6)。艾丁湖湖泊面积–湖水容积关系可用下列幂函数表示：

$$S = 0.2942V^{0.6377} \tag{1}$$

式中：S为湖泊面积(km²)；V为湖水容积(10⁴ m³)。

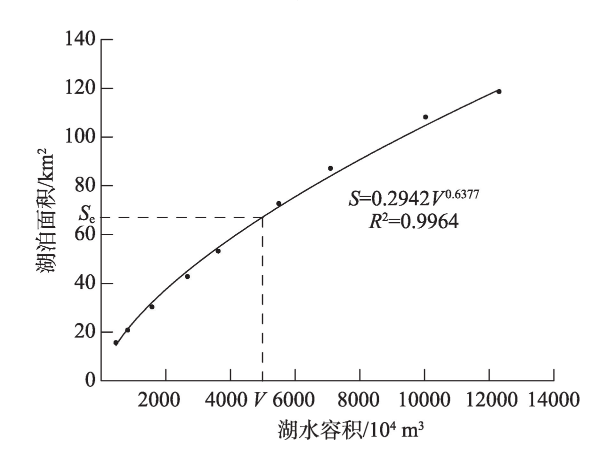


图6 艾丁湖湖面面积与湖水容积关系曲线

Fig. 6 Relationship between lake area and lake water volume of the Aiding Lake

基于湖泊形态学方法计算湖泊生态需水量的原理是将湖泊容积变化率(湖泊容积和面积关系函数的一阶导数)的最大值对应的湖泊容积作为生态需水量。当湖泊容积小于该值时，湖泊面积下降1个单位，湖泊容积将显著下降，湖泊功能也将严重退化[27]。将湖泊变化和湖水容积根据各自最大值进行标准化后，标准化后的曲线方程斜率为1的点为对应湖泊最小生态面积(S_e)，对应的湖水容积即为湖泊生态需水量(V_e)[28]。可计算艾丁湖主湖区生态湖泊面积为67 km²，对应生态需水量为4.99×10⁷ m³。

3.2 艾丁湖湖面蒸发量估算

世界气象组织建议以20 m²蒸发池观测水面蒸发量研究潜水湖泊蒸发量[29]。艾丁湖湖面未布设蒸发皿或蒸发池观测水面蒸发量，以吐鲁番气象站的E_{601}型蒸发皿观测蒸发量研究艾丁湖蒸发量。根据乌鲁木齐柴窝堡湖边器测蒸发量研究成果，E_{601}型蒸发皿和20 m²蒸发池蒸发量折算系数年均值为0.84[29]。水体蒸发强度和湖水含盐量有关，其他条

件相同时，水体含盐量越高，蒸发越小[30]。艾丁湖水体盐分含量高，3月湖水矿化度可达84 g·L^{-1}，根据前人对我国北方海盐产区卤水蒸发研究成果，水体含盐量对水面蒸发的影响可用卤水蒸发折算系数表示[31]：

$$F = 1 - 0.011(1 - r_1)^{-0.379}(°Be')^{1.001} \quad (2)$$

式中：r_1 为空气相对湿度(取小数)；°Be' 为盐水含盐量(用波美度表示，1波美度相当于1 L水含10 g氯化钠)。

艾丁湖蒸发量可按下式计算

$$E = E_{601} \cdot K \cdot F \quad (3)$$

式中：E 为湖面蒸发；K 为 E_{601} 型蒸发皿和20 m^{2}蒸发池蒸发量折算系数；F 为卤水蒸发折算系数。

利用吐鲁番气象站的 E_{601} 型蒸发皿观测蒸发量，最终折算后艾丁湖水面蒸发强度1986—2015年平均为884.3 mm·a^{-1}。艾丁湖1986—2015年水面蒸发量也呈减小趋势(图7)。

与我国西北干旱区其他湖泊蒸发研究成果比较(表1)，不同湖泊湖面蒸发量存在一定差异，但在数值量级上总体上是有可比性的，影响干旱区湖泊湖面蒸发量计算结果的主要因素包括：(1) 气象站蒸发皿观测代表性的问题，干旱区湖泊湖面蒸发多利用气象站蒸发皿观测数据折算的方法，但气象站位置一般距离湖泊较远，所处位置的湿度、温度均与湖面情况有较大差别。吐鲁番气象站海拔高度与艾丁湖高差180 m左右[32]，依其蒸发量观测资料推算艾丁湖水面蒸发量必带来一定误差。(2) 湖水含盐量对咸水湖湖面蒸发有较大影响。1986—1989年，计算艾丁湖平均湖面蒸发量比柴窝堡湖和艾比湖明显偏小，但柴窝堡湖为微咸水湖，艾比湖的湖面蒸发研究成果没有考虑盐度影响。因此，艾丁湖湖面蒸发量计算结果比这2个湖偏小是合理的。巴丹吉林沙漠湖泊苏木巴润吉林湖水TDS(总溶解固体)浓度为60～160 g·L^{-1}，湖中 E_{601} 蒸发皿使用浅层湖水观测蒸发量为1260 mm，考虑蒸发皿内盐度效应后估计湖面蒸发为1300~1500 mm[33]。

对比计算湖水最大容积和湖面蒸发量发现，在湖水面积较大的1989年，1996—2006年，计算的最大湖水容积要明显大于湖水蒸发量。如果没有夏季径流进入艾丁湖，冬季径流补充形成的湖面一般情况下将在夏、秋季蒸发消失，说明艾丁湖能在1996—2006年维持较大的湖水面积，与1996—2006年属丰水年份，阿拉沟和白杨河径流量较大且夏季径流也能够对艾丁湖进行一定补充有关，但并不能排除存在地下水对湖水进行补给的可能。

湖泊生态需水量指维持湖泊特定的水、盐和水

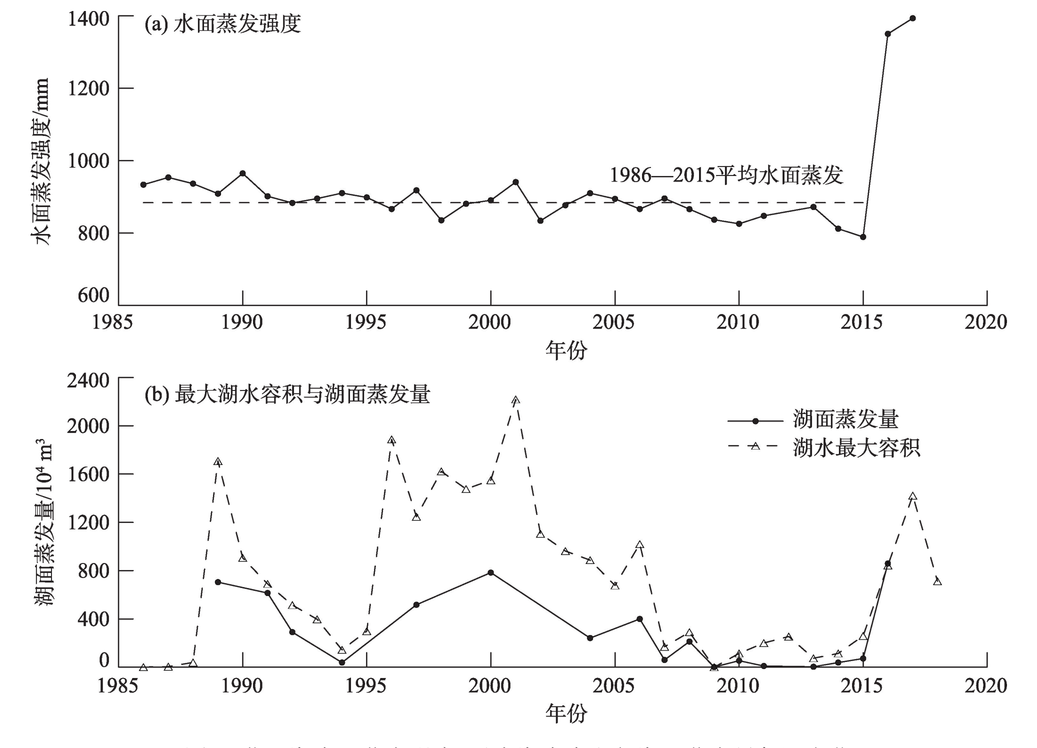


图7 艾丁湖水面蒸发强度、最大湖水容积与湖面蒸发量年际变化

Fig. 7 Calculated water surface evaporation, lake water volume and annual lake evaporation for the Aiding Lake

表1 干旱区湖泊湖面蒸发量对比

Tab. 1 Comparisons of lake evaporation in arid region

湖泊名称	湖泊类型	湖面蒸发量/($mm \cdot a^{-1}$)	计算时段/年	计算方法
艾丁湖	咸水湖	933.1	1986—1989	蒸发皿观测蒸发折算
艾比湖[34]	咸水湖	1367.3	1971—2000	蒸发皿观测蒸发折算(未考虑盐度效应)
巴丹吉林沙漠湖泊(苏木巴润吉林湖)[33]	咸水湖	1260.0	2013—2014	据湖中蒸发皿观测估计
巴丹吉林沙漠苏木吉林附近蒸发皿[35]	蒸发器用119.8 L^{-1}咸水	936.0	2010—2011	蒸发皿观测结果
柴窝堡湖[29]	微咸水湖	1312.5	1986—1987	蒸发皿观测蒸发折算
乌伦古湖[29]	淡水湖	949.3	1987—1988	蒸发皿观测蒸发折算
内蒙古呼伦湖[36]	淡水湖	989.9	1960—2008	Penman公式计算
东居延海[37]	淡水湖	1873.5	2002—2015	基于遥感数据计算

注:表中蒸发皿均为E_{601}型蒸发皿。

生生态条件,湖泊在一年内所消耗的水量[38]。对于干旱区的尾闾湖泊,湖泊的生态需水量主要用于维持湖泊水量平衡而消耗于蒸发的水量,因此与湖泊形态和容积有关,也受湖泊和地下水相互关系影响[39-40],根据以上计算的艾丁湖平均年蒸发量,维持2000以来的最大湖泊面积,按50 km^2计算,所需生态需水量为4.65×10^7 m^3。与根据湖泊面积和湖水容积关系曲线计算的湖泊生态需水量相近。

4 结论与讨论

(1)艾丁湖面积的变化过程是气候变化和人为因素共同影响的结果,1980年代以前,农业快速开发引水剥夺了入湖径流量,是导致艾丁湖变成季节性湖泊的根本原因。20世纪80年代是吐鲁番气候变化的转折点,艾丁湖历年冬季湖泊最大面积的年际变化规律与河流径流变化基本一致,自1980年代中期以来,总体呈增大趋势。艾丁湖作为雪冰融水为主要补给河流的尾闾,气候变化影响的河流径流量变化仍是决定艾丁湖湖面积的因素,但湖泊面积扩大的代价是天山冰川面积的萎缩。

(2)艾丁湖作为季节性湖泊冬季湖面面积主要受气候变化引起的入湖径流量变化影响,但要对对艾丁湖的生态恢复的根本途径还是减少湖区上游的农业引水,部分农业区耗水量转移到湖区虽最终也是通过蒸发散失,但对于吐鲁番当地生态和局地气候的改善将发挥重要作用。

(3)对艾丁湖湖面蒸发进行了初步估算,湖水含盐量对湖面蒸发量有明显影响,湖面蒸发量的准确测量是分析艾丁湖季节变化规律,评估艾丁湖生态需水量的关键,根据艾丁湖主湖区面积和湖水容积关系曲线以及蒸发量计算结果,艾丁湖生态需水量约为5.0×10^7 m^3。应于艾丁湖布设湖泊水热观测系统,对湖面蒸发量季节性变化进行观测和进一步研究。艾丁湖水量平衡和生态需水量评估需要对湖泊和地下水的相互作用也需要进行深入研究。

参考文献(References):

[1] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 论中国干旱区湖泊研究的重要意义[J]. 干旱区研究, 2007, 24(2): 137-140. [Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun, et al. On the importance of research on the lakes in arid land of China[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(2): 137-140.]

[2] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 亚洲中部干旱区的湖泊[J]. 干旱区研究, 2005, 22(4): 424-430. [Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun, et al. Study on the lakes in arid areas of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2005, 22(4): 424-430.]

[3] 胡汝骥, 陈曦, 姜逢清, 等. 人类活动对亚洲中部水环境安全的威胁[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 189-197. [Hu Ruji, Chen Xi, Jiang Fengqing, et al. Threat of human activities to hydrological regime in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(2): 189-197.]

[4] Ma Ronghua, Duan Hongtao, Hu Cm, et al. A half-century of changes in China's lakes: Global warming or human influence?[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(24): L24106.

[5] Li Qingting, Lu Linlin, Wang Cuizhen, et al. MODIS-derived spatiotemporal changes of major lake surface areas in Arid Xinjiang, China, 2000-2014[J]. Water, 2015, 7(10): 5731-5751.

[6] 朱刚, 高会军, 曾光. 近35 a来新疆干旱区湖泊变化及原因分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(1): 103-110. [Zhu Gang, Gao Huijun,

Zeng Guang. Lake change research and reasons analysis in Xinjiang arid regions during the past 35 years[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(1): 103-110.]

[7] 杨发相, 穆桂金, 赵兴有. 艾丁湖萎缩与湖区环境变化分析[J]. 干旱区地理, 1996, 19(1): 73-77. [Yang Faxiang, Mu Guijin, Zhao Xingyou. Analysis on the shrinkage of Aiding Lake and the environmental variation in the area around the lake[J]. Arid Land Geography, 1996, 19(1): 73-77.]

[8] 王亚俊, 吴素芬. 新疆吐鲁番盆地艾丁湖的环境变化[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 229-231. [Wang Yajun, Wu Sufen. Environment change over the Aydingkol Lake Region in Turpan Basin, Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 229-231.]

[9] 祁晨. RS_GIS技术支持下的近35 a艾丁湖演变研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2008. [Qi Chen. A Study on Change of the Aiding Lake in Recent Thirty-Five Years Based on RS and GIS Technology[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2008.]

[10] 阿依姑丽·托合提. 基于CHANS的吐鲁番艾丁湖水面积的动态变化及其驱动力分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013. [Aguri Tohti. Turpan Aiding Lake Area's Dayanmic Change and Driving Foreces Analysis Based on CHANS[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013.]

[11] 王冰. 艾丁湖生态需水研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015. [Wang Bing. The Research of Ecologial Water Requirement of Aiding Lake[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015.]

[12] 梁匡一. 新疆的盐湖及其地质、水文地质条件[J]. 干旱区研究, 1987, 4(1): 1-8. [Liang Kuangyi. Geology and hydrogeology conditions of salt lakes in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 1987, 4(1): 1-8.]

[13] 郝斌飞, 韩旭军, 马明国, 等. Google Earth Engine在地球科学与环境科学中的应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4): 600-611. [Hao Binfei, Han Xujun, Ma Mingguo, et al. Research progress on the application of Google Earth Engine in geoscience and environmental sciences[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(4): 600-611.]

[14] 王蔷, 黄翀, 刘高焕, 等. 基于Landsat 8 QA云标识的云影识别方法研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(1): 89-98. [Wang Qiang, Huang Chong, Liu Gaohuan, et al. Cloud shadow indentification based on QA band of Landsat 8[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(1): 89-98.]

[15] 张飞, 王娟, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 1998—2013年新疆艾比湖湖面时空动态变化及其驱动机制[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2848-2859. [Zhang Fei, Wang Juan, Tashpolat Tiyip, et al. The spatial and temporal dynamic changes and driving forces in the surface area of Ebinur Lake from 1998-2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2848-2859.]

[16] 阿孜古丽·卡哈尔, 阿不力克木·阿不力孜. 新疆水面蒸发量折算系数及时空分布分析[C]//中国水利学会2003学术年会. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. [Aziguri Kahar, Abrikmu Abrizi. Analysis of the conversion coefficient of water surface evaporation in Xinjiang[C]//Academic Conference of China Water Conservancy Society 2003 Annual Meeting. Beijing: China Water&Power Press, 2003.]

[17] 阿不力米提·阿不力克木, 周京武. 新疆吐鲁番盆地地表径流特征[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 717-723. [Ablikim Abulimiti, Zhou Jingwu. Surface discharge characteristics of the Turpan Basin, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 717-723.]

[18] 陈颖, 邵伟玲, 曹萌, 等. 新疆夏季高温日数的变化特征及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 58-66. [Chen Ying, Shao Weiling, Cao Meng, et al. Variation of summer high temperature days and its affecting factors in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 58-66.]

[19] 阿依加马力·克然木, 努尔巴衣·阿布都沙力克. 近52年新疆吐鲁番市气温及降水量变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 45-50. [Ayijiamali Keranmu, Nuerbayi Abudouzhalake. Analysis of temperature and rainfall changes in recent 52 years in Turpan city, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(12): 45-50.]

[20] 葛洪燕, 马静秋. 新疆吐鲁番近32年蒸发量变化特征及影响因子分析[J]. 青海气象, 2014, 3(3): 14-18. [Ge Hongyan, Ma Jingqiu. Evaporation variation characteristics and influencing factor analysis of Turpan in Xinjiang in recent 32 years[J]. Qinghai Meteorology, 2014, 3(3): 14-18.]

[21] 庞忠和. 新疆水循环变化机理与水资源调蓄[J]. 第四纪研究, 2014, 34(5): 907-917. [Pang Zhonghe. Mechanism of water cycle changes and implicaitons on water resources regulation in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(5): 907-917.]

[22] 李玉平, 韩添丁, 沈永平, 等. 天山南坡清水河与阿拉沟流域径流变化特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 127-135. [Li Yuping, Han Tianding, Shen Yongping, et al. Characteristics of runoff variation and its response to climate change of Qingshuihe River and Alagou River watersheds in Southern slopes of the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 127-135.]

[23] 李开明, 李忠勤, 高闻宇, 等. 近期新疆东天山冰川退缩及其对水资源影响[J]. 科学通报, 2011, 56(32): 2708-2716. [Li Kaiming, Li Zhongqin, Gao Wenyu, et al. Recent glacial retreat and its effect on water resources in eastern Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(32): 2708-2716.]

[24] 高建芳, 骆光晓. 气候变化对新疆哈密地区河川径流的影响分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 748-758. [Gao Jianfang, Luo Guangxiao. Analysis of the impact of climate changes on river's runoff in Hami Prefecture, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(4): 748-758.]

[25] 许民, 叶柏生, 赵求东, 等. 利用GRACE重力卫星监测新疆天山山区水储量时空变化[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 404-411.

[Xu Min, Ye Bosheng, Zhao Qiudong, et al. Spatiotemporal change of water reserves in the Tianshan Mountains, Xinjiang based on GRACE[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 404–411.]

[26] 廖杰, 王涛, 薛娴. 黑河调水以来额济纳盆地湖泊蒸发量[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 228–232. [Liao Jie, Wang Tao, Xue Xian. Lake's evaporation in the Ejin Basin since transfering water from the Heihe River[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 228–232.]

[27] 叶朝霞, 陈亚宁, 张淑花. 不同情景下干旱区尾闾湖泊生态水位与需水研究——以黑河下游东居延海为例[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 951–957. [Ye Chaoxia, Chen Yaning, Zhang Shuhua. Ecological water level and water demand of the rump lake in arid land under different scenarios: A case of East Juyanhai at the downstream of Heihe River[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 951–957.]

[28] Shang Songhao. Lake surface area method to define minimum ecological lake level from level-area-storage curves[J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(2): 133–142.

[29] 王积强. 天然湖泊蒸发量之测算[J]. 干旱区研究, 1994, 11(2): 52–56. [Wang Jiqiang. Measurement and calculation of evaporation of lakes[J]. Arid Zone Research, 1994, 11(2): 52–56.]

[30] 马宁, 王乃昂. 巴丹吉林沙漠腹地湖泊水面蒸发模拟的特殊性[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1141–1149. [Ma Ning, Wang Nai'ang. On the simulation of evaporation from lake surface in the hinterland of the Badain Jaran Desert[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(6): 1141–1149.]

[31] 洪嘉琏, 卢瑞芝. 我国北方四大盐海区卤水蒸发计算及其分布[J]. 地理研究, 1988, 7(2): 17–27. [Hong Jialian, Lu Ruizhi. The estimation and the distribution perfects of the evaporation of brine in the four big sea-salt areas in the northern China[J]. Geographical Research, 1988, 7(2): 17–27.]

[32] 王秋香, 刘卫平, 刘叶, 等. 吐鲁番气象站迁移前后资料的差异分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 22–32. [Wang Qiuxiang, Liu Weiping, Liu Ye, et al. Discrepancy analysis of meteorological data before and after station migration in extreme drought region: A case of Turpan station in eastern Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(1): 22–32.]

[33] 韩鹏飞, 王旭升, 胡晓农, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊水面蒸发与气象要素的动态关系[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1012–1020. [Han Pengfei, Wang Xusheng, Hu Xiaonong, et al. Dynamic relationship between lake lurface evaporation and meteorological factors in the Badain Jaran Desert[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1012–1020.]

[34] 崔龙, 穆振侠, 陈平, 等. 艾比湖湖水蒸发量分析[J]. 水资源保护, 2012, 28(6): 59–61, 65. [Cui Long, Mu Zhenxia, Chen Ping, et al. Analysis of evaporation from Ebinur Lake[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(6): 59–61, 65.]

[35] 董春雨. 阿拉善沙漠水循环观测实验与湖泊水量平衡[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. [Dong Chunyu. Observation Experiment of the Water Cycle and Lake Water Balance in Alxa Desert[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.]

[36] 王志杰, 李畅游, 贾克力, 等. 呼伦湖水面蒸发量计算及变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 88–95. [Wang Zhijie, Li Changyou, Jia Keli, et al. Caculation and characteristics of Hulun Lake surface evaporation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(3): 88–95.]

[37] 徐若秋扬. 东居延海面积变化及湖泊蒸发量的计算[D]. 北京: 中国地质大学, 2017. [Xuruo Qiuyang. Change of Water Area and Lake Evaporation Estimation of East Juyan Lake[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.]

[38] 杨泽元, 胡安焱. 干旱区内陆湖泊水盐变化和生态需水量研究[J]. 人民黄河, 2007, 29(5): 13–15. [Yang Zeyuan, Hu Anyan. Study on water and salt change and ecological water demand of inland lakes in arid regions[J]. Yellow River, 2007, 29(5): 13–15.]

[39] 赵力强, 张律吕, 王乃昂, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊形态初步研究[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1001–1011. [Zhao Liqiang, Zhang Lulu, Wang Nai'ang, et al. Morphology of the lakes in the Badain Jaran Desert[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1001–1011.]

[40] 黄小琴, 张一冰, 李英, 等. 银川市湖泊—地下水转化关系——以阅海湖为例[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1344–1350. [Huang Xiaoqin, Zhang Yibing, Li Ying, et al. Conversion relationship between lake and groundwater in Yinchuan City: A case study for the Yuehai Lake[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1344–1350.]

Dynamic variation and evaporation of seasonal lakes in arid areas: A case study for the Aiding Lake

CAO Guo-liang, LI Tian-chen, LU Chui-yu, XU Zhi-xia

(*China Institute of WaterResources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Lakes in arid areas are very sensitive to climate change and human activities, and lake area variations are controlled by changes and balance in the water cycle. Taking the Aiding Lake in Turpan, Xinjiang, as an example, this paper used Landsat remote sensing images and the water index method to interpret the lake area of 1986–2018. The relationships between lake area and regional climate change and river runoff changes were analyzed. The interannual variations of lake water storage and lake evaporation throughout the years were also evaluated. The results show that the maximum surface area of the Aiding Lake generally occurs in March, and the interannual variations of the largest area of the lake are basically consistent with changesin river runoff into the lake. The maximum lake volume calculated during 1996–2006 was significantly larger than the evaporation capacity of the lake. After 2006, the lake area decreased with the decline in runoff rates. River runoff affected by glacier shrinkage due to temperature change in arid regions is the decisive factor affecting change sin lake area in the wake of rivers in arid regions.

Keywords: arid area; seasonal lake; lake area; Aiding Lake



